

Бєдункова О. О. [1; ORCID ID: 0000-0003-4356-4124],
д.б.н., професор,
Борщевська І. М. [1; ORCID ID: 0009-0002-7036-8102],
к.с.-г.н., доцент,
Турчин Я. П. [1; ORCID ID: 0009-0002-3107-0186],
аспірант

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

БІОМОНІТОРИНГ ГЕНОТОКСИЧНИХ ЕФЕКТІВ В УРБАНІЗОВАНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Урбанізовані екосистеми характеризуються просторовою мозаїчністю забруднення та дією багатокомпонентних сумішей полютантів, здатних індукувати ушкодження ДНК, хромосомні аберації й мікроядерні порушення. Мета статті – систематизувати підходи до біомоніторингу генотоксичних ефектів у міському середовищі та порівняти інформативність біомоніторів і маркерів для підвищення доказовості екологічних висновків і підтримки управління станом середовища. Методологія поєднувала бібліометричний аналіз Scopus за 1995–2025 рр. з візуалізацією співзустрічальності ключових слів у VOSviewer та аналітичний огляд міжнародних і українських публікацій.

Побудована карта засвідчила центральність поняття «biomonitoring» та наявність взаємопов'язаних доменів. Урбаністично-атмосферний кластер (якість повітря, урбоекосистема) розміщений близько до ядра, що підкреслює вагомість біомоніторингу для оцінювання міських територій. Окремо ідентифіковано генотоксикологічний сегмент (генотоксичність, кометний аналіз, мікроядерний тест), пов'язаний із хіміко-токсикологічними вузлами (метали, забруднення, біоаккумуляція), що відображає схему «експозиція – біологічний ефект».

Узагальнено ієрархію методів: цитогенетичні індикатори як доступні маркери «кінцевих» проявів нестабільності; кометний аналіз як чутливий інструмент раннього виявлення ДНК-ушкоджень; молекулярні ДНК-біомаркери як засіб підвищення точності за умови контролю сезонності. Українські дослідження зосереджені на паліномоніторингу *Taraxacum officinale*, *Allium*-тесті, мультимаркерних схемах для міських зелених зон і застосуванні мікроядерного тесту для районування міст за мутагенним фоном. Показано, що інтеграція підходів і стандартизація дизайну відбору

підсилюють придатність результатів для ризик-орієнтованого планування заходів у містах.

Ключові слова: урбанізовані екосистеми; паліномоніторинг; кометний аналіз; мікроядерний тест; екологічне оцінювання.

Постановка проблеми. Інтенсивна урбанізація супроводжується зростанням техногенного навантаження на довкілля та ускладненням складу забруднювальних сумішей. Для міських екосистем характерні багатокомпонентні викиди транспортного походження, промислові емісії, вторинне забруднення, а також перерозподіл поллютантів у повітрі, ґрунтах і поверхневих відкладеннях. Значна частина цих чинників має потенціал індукувати такі генотоксичні ефекти, як ушкодження ДНК, хромосомні аберації, мікроядерні порушення та інші прояви генетичної нестабільності. Ці ефекти є критично важливими, оскільки становлять ранні біологічні сигнали екологічного ризику, пов'язані з мутагенезом, канцерогенезом, репродуктивними порушеннями та довготривалим зниженням життєздатності популяцій.

Мета, завдання і методологія дослідження. Мета статті – систематизація сучасних біомоніторингових підходів до оцінки генотоксичних ефектів в урбанізованих екосистемах та порівняння інформативності біомоніторів і маркерів у доказовості екологічних висновків і виявлення їх придатності для управління якістю міського середовища.

Для досягнення мети було визначено завдання: 1) виконати бібліометричний аналіз публікацій Scopus за ключовим словом «biomonitoring» із візуалізацією тематичних кластерів; 2) систематизувати сучасні методичні підходи до біомоніторингу генотоксичних ефектів в урбанізованих екосистемах; 3) узагальнити міжнародні та українські напрацювання щодо урбаністичного біомоніторингу та обґрунтувати практичну придатність підходів для управління якістю міського середовища.

Методологія літературного аналізу поєднувала бібліометричний і аналітичний підходи. Бібліометричну частину виконано на основі даних Scopus за період 1995–2025 рр. Для формування вибірки використовували пошуковий запит, що включав ключовий терміни «biomonitoring». Побудову мереж співзвучності ключових слів (co-occurrence) здійснювали за допомогою прикладної програми VOSviewer. Нормалізацію зв'язків проводили за алгоритмом

Association Strength, кластеризацією тематичних груп та візуалізацією карти, що відображають структуру й взаємозв'язки дослідницьких напрямів.

З метою розширення охоплення та зниження ризику упередження, пов'язаного з використанням однієї бази, результати бібліометричного аналізу Scopus доповнено цілеспрямованим пошуком іноземних публікацій в інших бібліографічних джерелах і репозиторіях (зокрема Web of Science, PubMed, Google Scholar). Окремим блоком проведено аналіз українських наукових досліджень, які відображають регіональні особливості біомоніторингу урбаністичного забруднення.

Аналіз останніх досліджень. Традиційний інструментальний контроль якості середовища у містах, попри свою необхідність, часто не забезпечує повної картини біологічних наслідків забруднення [1]. По-перше, моніторингові мережі мають обмежену просторову щільність і не відображають специфіку урбанізованого середовища (неоднорідність вуличної забудови, транспортні вузли, локальні джерела пилу тощо) [2]. По-друге, фізико-хімічні вимірювання фіксують концентрації окремих домішок у певний момент часу, але недостатньо відображають сумарну токсичність і синергетичну дію сумішей [3], а також не дають прямої відповіді щодо рівня ушкодження спадкового матеріалу живих організмів [4]. У результаті виникає розрив між екологічними даними про забруднення та оцінкою реального біологічного ризику, що ускладнює обґрунтування управлінських рішень у сфері екологічної безпеки міста [5].

Саме тому, у практиці оцінювання впливу забруднювачів на урбоекосистеми часто застосовують широкий спектр біологічних підходів [6; 7]. Чимало досліджень доводять показовість застосування біомоніторів через їх здатність фіксувати вплив полутантів у часі й просторі та відображати біологічно значущі наслідки на рівні генетичного апарату [8].

Виклад основного матеріалу. Бібліометрична візуалізація ключового слова "biomonitoring" (біомоніторинг) у публікаціях Scopus за 1995–2025 рр. засвідчує його роль як центрального концепту, навколо якого формуються кілька взаємопов'язаних тематичних доменів (рисунок).

Зв'язки терміну з поняттями «environmental monitoring» (моніторинг навколишнього середовища), «ecosystem» (екосистема), «pollution» (забруднення), «bioaccumulation» (біоаккумуляція), «water

(генотоксичність), «comet assay» (комет-аналіз), «micronucleus test» (мікроядерний тест), що показує генотоксикологічну складову біомоніторингу. Фіолетовий кластер відображає зближення біомоніторингу з оцінкою експозиції, механізмами відповіді організмів і новими забруднювачами (мікропластик, поліциклічні ароматичні вуглеводні тощо).

У центральній зоні мережі є доволі помітними такі індексні маркери як «nonhuman» (нелюдський), «animals» (тварини), «controlled study» (контрольоване дослідження), що свідчить про значну частку досліджень, у яких біомоніторинг реалізується через тест-організми та оцінки генотоксичних ефектів як ранніх біологічних відповідей на вплив полютантів.

Близкість до ядра карти «biomonitoring» урбаністично-атмосферного напрямку та його зв'язок із хіміко-токсикологічним доменом, зокрема поняттями «bioaccumulation» (біоаккумуляція), «metals» (метали), «chemical analysis» (хімічний аналіз), «cadmium» (кадмій), «lead» (свинець), «zinc» (цинк), «mercury» (ртуть), «nickel» (нікель) свідчать, що у значній частині робіт біомоніторинг реалізується через кількісну оцінку накопичення пріоритетних токсикантів (передусім важких металів), що є типовою ситуацією для міського середовища, де транспортні викиди, промислові джерела та вторинне забруднення формують стабільні градієнти металів у повітрі та міських субстратах. Водночас наявність у суміжних сегментах мережі понять генотоксичних ефектів підтверджує наукову доцільність фокусування огляду на біомоніторах генотоксичних ефектів в урбанізованих екосистемах і обґрунтовує пріоритетність досліджень, що поєднують урбаністичний контекст (міста, якість повітря) з підходами біомаркерної оцінки ДНК-пошкоджень і хромосомної нестабільності.

Основу біомоніторингу генотоксичного впливу забруднювачів у різних регіонах світу становлять цитогенетичні методи. До найбільш уживаних належать аналіз хромосомних аберацій та мікроядерний тест, які дозволяють реєструвати структурні порушення хромосом і наслідки неправильної сегрегації генетичного матеріалу. У контексті моніторингу атмосферного забруднення ці підходи є практично цінними, оскільки відображають інтегральну відповідь організмів на дію багатокомпонентних полютантних сумішей. Наприклад, тест Trad-MCN ґрунтується на оцінюванні частоти мікроядер – малих округлих структур, що виникають унаслідок ушкодження або втрати

хромосом/хроматид, які не включаються до дочірніх ядер через порушення їх приєднання до веретена поділу під час клітинного поділу.

Так, кілька досліджень з'ясували цитогенетичний вплив забруднення повітря в міських середовищах з інтенсивним рухом транспорту, використовуючи чутливу до змін навколишнього середовища рослину *Tradescantia pallida*. Зокрема, застосування біотесту Trad-MCN на бруньках *T. pallida* у дев'яти бразильських містах спостерігалася позитивна кореляція між частотою мікроядер та потоком транспортних засобів ($r = 0,67$; $p \leq 0,001\%$); у цілому, вища частота мікроядер мала тенденцію бути присутньою в місцях з низькою відносною вологістю, великими висотами та потоками транспортних засобів [9]. В іншому дослідженні мікроядерний аналіз показав, що кількість мікроядер у ранніх клітинах пилкових тетрад *T. pallida* також пов'язана з інтенсивністю транспортного руху. При цьому, збільшена кількість епідермальних клітин і продихів, а також підвищена щільність продихів, що спостерігались у місцях з більшим рухом транспорту, автори пояснюють як фізіологічні реакції цих рослин на посилений газообмін у сильно забрудненому середовищі [10]. Також автори наведених досліджень зазначають, що цитогенетичні індикатори характеризують переважно «кінцеві» прояви хромосомної нестабільності, що є важливим для екологічного ранжування урбанізованих територій за рівнем генотоксичного ризику.

Широко застосовується в екологічному біомоніторингу і кометний аналіз (comet assay), що належить до найбільш інформативних методів оцінювання первинних ушкоджень ДНК, у т.ч. і для оцінки впливу забруднювачів повітря [11]. Метод «comet assay», або «single-cell gel electrophoresis» (SCGE), базується на електрофорезі окремих клітин у гелі, під час якого фрагменти ДНК мігрують за межі ядра, а інтенсивність і довжина «хвоста» відображають ступінь розривів ДНК і, відповідно, рівень генотоксичного впливу [9]. Так, високий рівень пошкодження ДНК у дикорослих рослин (*Citrullus colocynthis*, *Anabasis setifera*, *Prosopis juliflora*, *Prosopis farcta*, *Suaeda vermiculata* та ін.) було виявлено в ході біомоніторингу урбанізованих територій Йорданії вздовж магістралей інтенсивного руху транспорту та промислових зон. При цьому, хімічний аналіз ґрунту виявив високий рівень Cr, Cu, Zn, Cd та Pb, а рівень

пошкодження ДНК тісно корелював із швидкістю перекисного окислення ліпідів у надземних частинах рослин [10].

Важливою перевагою кометного аналізу є можливість його застосування до різних типів клітин, що дозволяє адаптувати тест-систему до конкретних біомоніторів (рослинних, тваринних або клітинних моделей) і умов експозиції. На відміну від частини цитогенетичних підходів, кометний аналіз чутливо фіксує сублетальні, ранні ушкодження ДНК, які можуть бути оборотними, але мають високе значення як ранні маркери екологічного ризику [11].

Поряд із цитогенетичними тестами та кометним аналізом, останнім часом зростає роль молекулярних підходів як більш точного інструменту моніторингу ушкоджень ДНК [12]. Так, у південному Китаї було доведено негативний вплив поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) від міського дорожнього руху на метаболічні шляхи амінокислот, нікотинаміду, пурину та стероїдних гормонів населення через окислювальне пошкодження ДНК [13]. Молекулярні маркери й ДНК-біомаркери розглядають як перспективний напрям, оскільки вони забезпечують високу чутливість і точність оцінювання впливу генотоксичних сполук, дозволяючи фіксувати ранні прояви генетичної нестабільності та підвищувати доказовість інтерпретації результатів біомоніторингу [14]. У прикладному вимірі це створює можливості для більш детального розмежування внеску окремих класів полютантів, оцінювання механізмів ушкодження та інтеграції генотоксичних показників у ризик-орієнтовані моделі управління якістю міського середовища [15; 16].

Українські наукові публікації за напрямом біомоніторингу урбанізованих екосистем базуються переважно на підходах біоіндикації атмосферного забруднення, оцінювання ризиків контамінації міських ґрунтів (у т. ч. важкими металами) та використання рослинних тест-систем для скринінгу цито- і генотоксичних ефектів. Хоча частина публікацій не завжди прямо використовує термін «генотоксичність», їх індикаторні показники (життєздатність, стерильність пилку; мітотичний індекс; хромосомні аберації; мікроядерні маркери) є функціонально близькими до концепції ранніх генетичних порушень як відповіді біоти на урбаністичні полютанти.

Найбільш представленими є українські дослідження за принципом паліномоніторингу із використанням кульбаби звичайної (*Taraxacum officinale*) як масового та екологічно пластичного виду

міських зелених зон. У роботі, виконаній на матеріалі паркових екосистем Києва, показано можливості оцінки стану урбоекосистем за показниками чоловічої генеративної системи: часткою стерильного пилку, часткою тератоморфних пилкових зерен та інтегральними індексами палінотоксичного ефекту, що корелюють із градієнтом антропогенного навантаження в межах міста [17]. Доповнює цей напрям дослідження на прикладі Кривого Рогу, де реакцію пилку *T. officinale* інтерпретовано як біоіндикаційний відгук на різні рівні атмосферного забруднення. Зокрема, автори зафіксували зростання частки нежиттєздатних (стерильних) пилкових зерен до 50% і появи аномалій у вигляді сочевицеподібної форми пилку [18].

Існують також підходи, де в якості біомаркерів генотоксичності повітряного середовища міст використовується рівень ушкодженості клітин епітелію слизової оболонки дітей дошкільного віку на основі мікроядерного тесту. Використання цього підходу дозволило авторам розробити картосхеми районування міста Рівне за ступенем мутагенного фону, а також запропонувати рекомендації щодо зниження цитогенетичного ризику та поліпшення екологічного стану урбоекосистеми [19].

Одним із прикладів комплексного підходу в межах урбоекосистеми є робота з оцінювання стану атмосферного повітря Полтавського міського парку, де поєднано ліхеноіндикацію, фітоіндикацію (включно з використанням *T. officinale*) та дендроіндикацію (через показники флюктуючої асиметрії) [19]. На противагу попереднім дослідженням, подібні роботи становлять так зване мультимаркерне відображення присутності забруднювачів у міському середовищі, однак не наводять конкретні залежності між рівнями самих забруднювачів чи їх сукупностей із рівнями цитогенетичних пошкоджень.

Як паралельний напрям українських досліджень можна виділити використання рослинних тест-систем для оцінки цито- і генотоксичних ефектів у результаті контамінації ґрунтів важкими металами [20], а також для виявлення комбінованих урбаністичних впливів на поверхневі води, стоки, водопровідну воду тощо [21–23]. Як високочутливу тест-систему при цьому використовують проростки *Allium cepa*.

Окремим блоком можна виділити цитогенетичні маркери гідробіонтів як інструмент біомоніторингу урбанізованих водних об'єктів [24; 25]. Попри певні труднощі інтерпретації цитогенетичних

показників, цей напрям значно розширює традиційні підходи генотоксичного біомоніторингу урбанізованих екосистем і доводить, що хребетні гідробіоти можуть відображати інтегральний ефект впливу полютантів у міських річках, водосховищах, каналах тощо [26].

Спираючись на проведений огляд і аналіз змісту досліджень, стає очевидним, що в біомоніторингу генотоксичного навантаження урбоекосистем, відслідковуються переваги та недоліки для всіх існуючих підходів. Зокрема, найбільш доступними та задіяними в практиці екологічного оцінювання є цитогенетичні індикатори, як «кінцеві» прояви нестабільності організмів біоіндикаторів та тест-систем. Однак, вони часто обмежені в порівнянні результатів через відмінності в дизайні досліджень та статистичній обробці. Доволі чутливим і виправданим є кометний аналіз, що дає уявлення про ранні ушкодження ДНК біомоніторів, а отже, може сприяти попередженню масштабних наслідків урбаністичного забруднення. При цьому, важливою передумовою є вибір тест-об'єктів і маркерів. Молекулярні ДНК-біомаркери, що також дають високу точність, можуть певною мірою змінювати реакції залежно від сезонності, мікроклімату, трофічного статусу біомонітору тощо. Практична придатність генотоксичного біомоніторингу для управління якістю міського середовища полягає в тому, що він забезпечує біологічно значущу оцінку ризику, тобто фіксує не лише наявність полютантів, а й реальний ефект для живих організмів у конкретних міських локаціях.

Висновки. Урбанізація формує умови для багатокomпонентного забруднення та перерозподілу полютантів у повітрі, ґрунтах і відкладеннях, що робить генотоксичні ефекти важливими ранніми сигналами екологічного ризику. Бібліометрична карта Scopus підтверджує, що міський контекст (якість повітря, урбоекосистеми) є одним із ключових напрямів застосування біомоніторингу, а генотоксичні тести (мікроядерний, кометний) утворюють помітну складову сучасного дослідницького поля. Для оцінки генотоксичного навантаження в урбоекосистемах найбільш методично виправданою є ієрархія підходів: цитогенетичні індикатори; кометний аналіз; молекулярні ДНК-біомаркери. Існує потреба поглиблення досліджень, де б для урбанізованих територій системно демонструвалися кількісні залежності між комплексом полютантів, експозицією та рівнями генотоксичних ефектів.

- 1.** Drawbacks of Traditional Environmental Monitoring Systems / S. A. Sani et al. *Computer and Information Science*. 2023. Vol. 16, no. 3. P. 30. URL: <https://doi.org/10.5539/cis.v16n3p30>.
- 2.** Potential heterogeneity in the relationship between urbanization and air pollution, from the perspective of urban agglomeration / Y. Wang et al. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 298. P. 126822. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126822>.
- 3.** Chapter 4. Data Quality Assessment for In Silico Methods: A Survey of Approaches and Needs / M. Nendza et al. *In Silico Toxicology*. Cambridge. P. 59–117. URL: <https://doi.org/10.1039/9781849732093-00059>.
- 4.** Usman G., Mashood A. A., Aliyu A., Adamu K. S., et al. Effects of environmental pollution on wildlife and human Health and novel mitigation strategies. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2023. Vol. 19, no. 2. P. 1239–1251. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.2.1644>.
- 5.** Cai Y., Dong R., Lian A., Wang, Z., et al. Analysis of hotspots of urban eco-environmental problems: A case study of Shenzhen City. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*. 2025. Vol. 23, no. 1. P. 106–113. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2025.01.011>.
- 6.** Mota L. M., Bravo J. V. M., Pereira B. B. Urban environmental risk assessment through biomonitoring: a multivariate approach using *Mangifera indica*, lichens, and air pollutants. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 385. P. 127102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127102>.
- 7.** Vuono M., Di Lonardo D. P., Schwartz C., Terribile F. Advancing urban soil health: challenges, knowledge gaps, and future research perspectives. *Landscape and Urban Planning*. 2026. Vol. 266. P. 105534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105534>.
- 8.** C. F. Campos, Santos V. S. V., de Campos Júnior E. O., da Costa E. D., et al. Assessment of genotoxicity of air pollution in urban areas using an integrated model of passive biomonitoring. *Environmental Pollution*. 2024. P. 124219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124219>.
- 9.** Rocha A. d. N., Candido L. S., Pereira J. G., Silva C. A. M., et al. Evaluation of vehicular pollution using the TRAD-MCN mutagenic bioassay with *Tradescantia pallida* (Commelinaceae). *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 240. P. 440–447. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.091>.
- 10.** Crispim B. A., Spósito J. C. V., Mussury R. M., Seno L. O., et al. Effects of atmospheric pollutants on somatic and germ cells of *Tradescantia pallida* (Rose) D.R. HUNT cv. Purpurea. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2014. Vol. 86, no. 4. P. 1899–1906. URL: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201420140338>.
- 11.** He X., Chen F., Zhou L., Sun Y., et al. The comet assay: A contemporary approach for detecting genomic instability. *DNA Repair*. 2025. Vol. 154. P. 103899. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2025.103899>.
- 12.** Medeiros M. H. G., Sanchez A. B., Di Mascio P. DNA adducts mapping as possible urban pollution biomarker. *Toxicology Letters*. 2018. Vol. 295. P. S192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.06.865>.
- 13.** Zhang Y.-J., Wang X.-X., Zeng L.-J., et al. Rewiring the nexus between urban traffic pollution-derived polycyclic aromatic hydrocarbon exposure and DNA injury via urinary metabolomics. *Zhang Environmental Pollution*. 2024. P. 125188. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125188>.
- 14.** Poblete-Naredo I., Albores A. Molecular biomarkers to assess health risks due to environmental contaminants exposure. *Biomédica*. 2016. Vol. 36, no. 2. P. 309. URL: <https://doi.org/10.7705/biomedica.v36i3.2998>.
- 15.** Matković K., JuričA., Jakovljević I., Kazensky L., et al. Evaluating air pollution and BTEX exposure effects on DNA damage: A human biomonitoring study in Zagreb, Croatia. *Atmospheric Environment*. 2025. Vol. 343. P. 121004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.121004>.
- 16.** Vozdova M.,

Kubickova S., Kopecka V., Sipek J. et al. Human sperm mitochondrial DNA copy numbers and deletion rates: Comparing persons living in two urban industrial agglomerations differing in sources of air pollution. *Mutation Research – Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2024. Vol. 899. P. 503824. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503824>. **17.** Mazura M., Miroshnyk N., Teslenko I. Using of *Taraxacum officinale* (L.) pollens for the urban park bioindication. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10, no. 5. P. 49–53. URL: https://doi.org/10.15421/2020_205. **18.** Hryshko V. M., Komarova I. O. Bioindication of air pollution by the reaction of pollen grains *Taraxacum officinale* F. H. Wigg (on example of the Kryvyi Rig). *ScienceRise*. 2016. № 1 (22). Т. 5. P. 15. URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69276>. **19.** Клименко М. О., Лико Д. В., Прищеп А. М., Каськів М. В. Оцінювання стану міста Рівне за показниками цитогенетичного моніторингу : монографія. Рівне : НУВГП, 2018. 187 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/9346>. (дата звернення: 02.10.2025). **20.** Ханнанова О. Р., Арканова А. А. Біоіндикаційна оцінка стану атмосферного повітря Полтавського міського парку. *Біологія та екологія*. 2017. № 1–2. Том 3. С. 69–75. **20.** Dovgalyuk A. Environmental contamination by toxic metals and its indication by plant test systems. *Studia Biologica*. 2013. Vol. 7, no. 1. P. 197–204. URL: <https://doi.org/10.30970/sbi.0701.269>. **21.** Аристархова Е. О. Використання *Allium cepa* L. для оцінки токсичності питної води. *Вісник аграрної науки*. 2017. С. 58–62. **22.** Skok S. V. Methodical aspects of the evaluation of the impact of urban wastewater on the Dnipro river quality. *Water bioresources and aquaculture*. 2020. No. 2. P. 251–267. URL: <https://doi.org/10.32851/wba.2020.2.20>. **23.** Kutsokon N. Allium-Assay In Evaluation of Drinking and Surface Water Mutagenicity. *Dangerous Pollutants (Xenobiotics) in Urban Water Cycle*. Dordrecht. P. 81–87. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6795-2_9. **24.** Клименко М. О., Бедункова О. О. Біоіндикація стану гідроекосистем за морфологічними та цитогенетичними характеристиками гомеостазу риб : монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 302 с. **25.** Бедункова О. О. Вплив комбінованих ефектів забруднення річки Іква на цитогенетичний гомеостаз представників іхтіофауни. *Біологічні системи*. 2016. Вип. 8. С. 28–34. **26.** Гандзюра В. П., Клименко М. О., Бедункова О. О. Біосистеми в токсичному середовищі : монографія. Рівне : НУВГП, 2021. 261 с.

REFERENCES:

1. Drawbacks of Traditional Environmental Monitoring Systems / S. A. Sani et al. *Computer and Information Science*. 2023. Vol. 16, no. 3. P. 30. URL: <https://doi.org/10.5539/cis.v16n3p30>. **2.** Potential heterogeneity in the relationship between urbanization and air pollution, from the perspective of urban agglomeration / Y. Wang et al. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 298. P. 126822. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126822>. **3.** Chapter 4. Data Quality Assessment for In Silico Methods: A Survey of Approaches and Needs / M. Nendza et al. *In Silico Toxicology*. Cambridge. P. 59–117. URL: <https://doi.org/10.1039/9781849732093-00059>. **4.** Usman G., Mashood A. A., Aliyu A., Adamu K. S., et al. Effects of environmental pollution on wildlife and human Health and novel mitigation strategies. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2023. Vol. 19, no. 2. P. 1239–1251. URL:

<https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.2.1644>. **5.** Cai Y., Dong R., Lian A., Wang, Z., et al. Analysis of hotspots of urban eco-environmental problems: A case study of Shenzhen City. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*. 2025. Vol. 23, no. 1. P. 106–113. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2025.01.011>. **6.** Mota L. M., Bravo J. V. M., Pereira B. B. Urban environmental risk assessment through biomonitoring: a multivariate approach using *Mangifera indica*, lichens, and air pollutants. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 385. P. 127102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127102>. **7.** Vuono M., Di Lonardo D. P., Schwartz C., Terribile F. Advancing urban soil health: challenges, knowledge gaps, and future research perspectives. *Landscape and Urban Planning*. 2026. Vol. 266. P. 105534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105534>. **8.** C. F. Campos, Santos V. S. V., de Campos Júnior E. O., da Costa E. D., et al. Assessment of genotoxicity of air pollution in urban areas using an integrated model of passive biomonitoring. *Environmental Pollution*. 2024. P. 124219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124219>. **9.** Rocha A. d. N., Candido L. S., Pereira J. G., Silva C. A. M., et al. Evaluation of vehicular pollution using the TRAD-MCN mutagenic bioassay with *Tradescantia pallida* (Commelinaceae). *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 240. P. 440–447. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.091>. **10.** Crispim B. A., Spósito J. C. V., Mussury R. M., Seno L. O., et al. Effects of atmospheric pollutants on somatic and germ cells of *Tradescantia pallida* (Rose) D.R. HUNT cv. Purpurea. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2014. Vol. 86, no. 4. P. 1899–1906. URL: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201420140338>. **11.** He X., Chen F., Zhou L., Sun Y., et al. The comet assay: A contemporary approach for detecting genomic instability. *DNA Repair*. 2025. Vol. 154. P. 103899. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2025.103899>. **12.** Medeiros M. H. G., Sanchez A. B., Di Mascio P. DNA adducts mapping as possible urban pollution biomarker. *Toxicology Letters*. 2018. Vol. 295. P. S192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.06.865>. **13.** Zhang Y.-J., Wang X.-X., Zeng L.-J., et al. Rewiring the nexus between urban traffic pollution-derived polycyclic aromatic hydrocarbon exposure and DNA injury via urinary metabolomics. *Zhang Environmental Pollution*. 2024. P. 125188. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125188>. **14.** Poblete-Naredo I., Albores A. Molecular biomarkers to assess health risks due to environmental contaminants exposure. *Biomédica*. 2016. Vol. 36, no. 2. P. 309. URL: <https://doi.org/10.7705/biomedica.v36i3.2998>. **15.** Matković K., JuričA., Jakovljević I., Kazensky L., et al. Evaluating air pollution and BTEX exposure effects on DNA damage: A human biomonitoring study in Zagreb, Croatia. *Atmospheric Environment*. 2025. Vol. 343. P. 121004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.121004>. **16.** Vozdova M., Kubickova S., Kopecka V., Sipek J. et al. Human sperm mitochondrial DNA copy numbers and deletion rates: Comparing persons living in two urban industrial agglomerations differing in sources of air pollution. *Mutation Research – Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2024. Vol. 899. P. 503824. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503824>. **17.** Mazura M., Miroshnyk N., Teslenko I. Using of *Taraxacum officinale* (L.) pollens for the urban park bioindication. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10, no. 5. P. 49–53. URL: https://doi.org/10.15421/2020_205. **18.** Hryshko V. M., Komarova I. O. Bioindication of air pollution by the reaction of pollen grains *Taraxacum officinale* F. H. Wigg (on example of the Kryvyi Rig). *ScienceRise*. 2016. № 1 (22). T. 5. P. 15. URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69276>. **19.** Klymenko M. O., Lyko D. V.,

Pryshchepa A. M., Kaskiv M. V. Otsiniuvannia stanu mista Rivne za pokaznykamy tsytohenetychnoho monitorynhu : monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2018. 187 s. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/9346>. (data zvernennia: 02.10.2025). **20.** Khannanova O. R., Arkanova A. A. Bioindykatsiina otsinka stanu atmosferneho povitria Poltavskoho miskoho parku. *Biolohiia ta ekolohiia*. 2017. № 1–2. Tom 3. S. 69–75. **20.** Dovgalyuk A. Environmental contamination by toxic metals and its indication by plant test systems. *Studia Biologica*. 2013. Vol. 7, no. 1. P. 197–204. URL: <https://doi.org/10.30970/sbi.0701.269>. **21.** Arystarkhova E. O. Vykorystannia Allium cepa L. dlia otsinky toksychnosti pytnoi vody. *Visnyk ahrarnoi nauky*. 2017. S. 58–62. **22.** Skok S. V. Methodical aspects of the evaluation of the impact of urban wastewater on the Dnipro river quality. *Water bioresources and aquaculture*. 2020. No. 2. P. 251–267. URL: <https://doi.org/10.32851/wba.2020.2.20>. **23.** Kutsokon N. Allium-Assay In Evaluation of Drinking and Surface Water Mutagenicity. *Dangerous Pollutants (Xenobiotics) in Urban Water Cycle*. Dordrecht. P. 81–87. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6795-2_9. **24.** Klymenko M. O., Biedunkova O. O. Bioindykatsiia stanu hidroekosystem za morfolohichnymy ta tsytohenetychnymy kharakterystykamy homeostazu ryb : monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2017. 302 s. **25.** Biedunkova O. O. Vplyv kombinovanykh effektiv zabrudnennia richky Ikva na tsytohenetychnyi homeostaz predstavnykiv ikhtiofauny. *Biolohichni systemy*. 2016. Vyp. 8. S. 28–34. **26.** Handziura V. P., Klymenko M. O., Biedunkova O. O. Biosystemy v toksychnomu seredovyshti : monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2021. 261 s.

Biedunkova O. O. [1; ORCID ID: 0000-0003-4356-4124],

Doctor of Biological Sciences, Professor,

Borshchevska I. M. [1; ORCID ID: 0009-0002-7036-8102],

Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor,

Turchyn Ya. P. [1; ORCID ID: 0009-0002-3107-0186],

Post-graduate Student

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

BIOMONITORING OF GENOTOXIC EFFECTS IN URBANIZED ECOSYSTEMS

Urbanized ecosystems are characterized by the spatial mosaicity of pollution and the action of multicomponent mixtures of pollutants that can induce DNA damage, chromosomal aberrations, and micronuclear disorders. The aim of this article is to systematize approaches to biomonitoring of genotoxic effects in the urban environment and compare the informativeness of biomonitors and markers to enhance the evidence base for ecological conclusions and support environmental management. The methodology combined bibliometric analysis of Scopus for the period 1995–2025 with

keyword co-occurrence visualization in VOSviewer and an analytical review of international and Ukrainian publications.

The constructed map demonstrated the centrality of the concept of "biomonitoring" and the presence of interconnected domains. The urban-atmospheric cluster (air quality, urban ecosystem) is located close to the core, which emphasizes the importance of biomonitoring for the assessment of urban areas. Separately, a genotoxicological segment (genotoxicity, comet assay, micronucleus test) associated with chemical-toxicological nodes (metals, pollution, bioaccumulation) was identified, reflecting the "exposure-biological effect" scheme.

The hierarchy of methods was summarized: cytogenetic indicators as available markers of "final" manifestations of instability; comet assay as a sensitive tool for early detection of DNA damage; molecular DNA biomarkers as a means of increasing accuracy under seasonal control. Ukrainian research focuses on palynomonitoring of *Taraxacum officinale*, the *Allium* test, multimarker schemes for urban green zones, and the use of the micronucleus test for zoning cities based on mutagenic background. It is demonstrated that integrating approaches and standardizing sampling design enhances the suitability of results for risk-based planning of measures in cities.

Keywords: urbanized ecosystems; palynomenon monitoring; comet analysis; micronucleus test; ecological assessment.

Отримано: 10 листопада 2025 року
Прорецензовано: 17 листопада 2025 року
Прийнято до друку: 28 листопада 2025 року